高トルクなRCサーボモータを用いたエネルギー変換効率の良い柔軟関節６自由度肩義手(SDP，ロボットアーム 1．45kg)の協調動作制御システム

木下　敏治*　　山口　彰大**　　安藤　誠基***　　香川　優介****　　大東　賢治*****

A coordinated motion control system for energy-saving model flexible joint shoulder disarticulation prosthesis (SDP, robot arm 1.45kg) with 6degrees of freedom using high torque RC servo motors

Toshiharu KINOSHITA, Shota YAMAGUCHI, Masaki ANDO, Yusuke KAGAWA and Kenji OHIGASHI

Abstract

In this paper I propose a quite high torque practical SDP (robot arm) using new RC servo motor. By using Motion Processor 2 (MP2) control circuit (KONDO KAGAKU Co.), I can provide a simplified total system of a compliance control method. The flexible joint SDP (robot arm) have 6 degrees of freedom (θ_1: shoulder rotation angle, θ_2: shoulder flexion-extension angle, θ_3: humeral rotation angle, θ_4: elbow flexion-extension angle θ_5: wrist rotation angle, θ_6: hand prehension angle) I used SDP (robot arm) movement control program using script language. (KONDO KAGAKU Co.) A practical flexible joint SDP (flexible joint robot arm 1.45Kg) can make by new vibration control theory (Flexible Joint Robot Arm Control Kinoshita theory was proposed by us and was called “FJRACK theory”) which is look like FST(Fixed Suspension Transducer) of B&W Co.. A rise time, a fall time, settling time and steady-state deviation using control engineering is possible to solve it from the GL900’s data. As a result, prehension part of flexible joint SDP (robot arm) was able to stop vibration of a hand by principle of conservation of energy.

Keywords: coordinated motion, flexible joint prosthesis, SDP, robot arm 1.45kg, FJRACK theory

1. まえがき

1.1　はじめに

全国 18 歳以上の身体障害者数（在宅）は，348 万 3000 人（平成 18 年 7 月度）と推計されており，その中で肢体不自由者は全体の 50.5%を占めている。また前回調査（平成 13 年 6 月度）と比較して由者は 0.6%増と年々増加傾向となっている。肢体不自由者のための義手，義足の中で，肩義手は前腕義手などの他の義手，義足に比べて開発が遅れている。その中で電動式前腕義手 [1)~4)]は，手の開閉の制

*香川高等専門学校詫間キャンパス
電子システム工学科
**三菱電機株式会社通信機製作所
***富士重工業株式会社
****扶桑建設工業株式会社
*****大岡技研株式会社

御に筋電を利用して操作する方式で実用化されているが，一方で電動式肩義手は実用化が遅れている。[5)~9)]肩義手（赤澤堅造　他，動力義手・装具の研究開発の現状と将来，BME（医用電子と生体工学），Vol.13，No.2，p.34-41(1999)）は手先まで含めると自由度が非常に多いため制御が複雑になり多自由度になればそれだけ駆動させるアクチュエータの数が増え，重量が重くなる。現在，電動式肩義手は制御方式や重量など基本的な問題点が多く，実用に至るには軽量化及び外観の良さが最大の問題である。[10)~16)]

1.2　経緯

本研究は現在の制御理論では安定な制御が非常に難しいとされている柔軟関節構造を肩の部分に持つ6自由度肩義手である。[17)18)]エネルギー吸収ボックスと名付けたアルミニウムで出来た入れ物にアクチュエータをぴったりとネジ止めすることにより一平面内での振動モードは存在できるがそれ以外の振動モードはエネルギー吸収ボックスの弾性限界内のゆがみとアルミの表面振動エネルギーを熱エネルギーとして刻々と放出されるように設計してある。柔軟関節肩義手の制御という今までにない方式を音響工学の最新理論[19)~21)]（B&W，FST（フィクスト・サスペンション・トランデューサー）コーンからエッジは伝わる屈曲波を熱エネルギーに変換する）を用いて肩義手の実用化に近づく1つの方法を見つけ出すことが出来た。B&W社のFSTの理論でエネルギー吸収ボックスの弾性変形を一定の範囲の変形にとどめる様にする。箱全体がバネの様に元に戻る構造である。本研究は，エネルギー保存則を用いて肩義手のθ_1，θ_2の余分のエネルギー成分を熱エネルギーに変換して弾性変形範囲を一定値以内にとどめることにより，肩義手の手先が振動しない制御を実現した。以上の工夫により，2007年に上腕水平回転角θ_1・上腕挙上角θ_2の2自由度にエネルギー吸収ボックスを用いることにより，非常に安定した動作を本体重量1024gで実現した。香川高等専門学校研究紀要第1号[1)2)]により，本方式が肩義手だけでなくあらゆるロボットに適用できることを示した。図1にモーションプロセッサ2HV(24g)の写真を示す。RCB-1の代わりにMP2HV[3)]，KRS-6003HV(100g，トルク 67kg・cm，11.1V)を用いて高トルクで軽量(1.45kg)な6自由度肩義手の協調動作制御システムを設計製作することが本研究の目的である。義手の開発では世界№1の実績を持つオットーボック社(Otto Bock)の，現在実用化を目的としている肩義手の重量は2.5kgである。現在アルミニウムを肩義手の部品として用いているが，マグネシウム合金に変更すれば部品の重量を70%に軽量化し，かつ強度を高める事が可能である。経済的に余裕があればRCサーボモータをSRモータ（ステッピングモータを改良したもので高トルク，かつ小型軽量化が可能な次世代のモータであり，日本電産などが希土類を用いないSRモータの開発に2010年成功している）に変更できればより軽量化が可能である。また，小型軽量なポテンショメータを用いて肩の上腕水平回転θ_1及び上腕挙上θ_2の値が，柔軟関節構造にすることによりどのような影響を受けているかを，GRAPH TECのGL900を用いてデータ化し，制御工学の各パラメータの値を測定した。図2に前腕部に使用した佐藤技研の装飾用グローブとソケットの外観を示す。

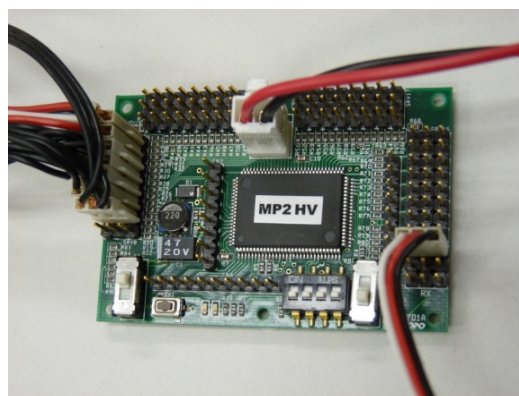



図1.　モーションプロセッサ2HV

図2.　佐藤技研の装飾用グローブとソケット

本方式を産業用ロボットへ応用すればエネルギー問題の画期的な解決法となる。

本研究の目的は，使用者が簡単に制御でき，人間の動作に近い肩義手の開発である。[22)~26)]本研究では，2009 年まで耐久テスト（約 3 年間）を行ってきた肩義手[27)28)]を参考に，新しい肩義手を設計製作することである。

2．研究概要

本研究では，これまでに日常生活においてスプーンでものを食べる，コップで水を飲む等の食事動作，電話に出る等の机上動作を実現することを目的として肩義手を試作した。2007 年度の試作機は RC サーボモータ専用の RCB-1 をパソコンに接続し，7 個のモータを同時に協調動作制御する。300g のものを安定に移動できる。約 3 年間耐久テストを繰り返した後，朝 9 時より夕方 5 時まで手先に持ったボールを投げるなどの各種協調動作を実行する実験を繰り返し，義手の破壊テストを行った。その結果最高速度でボールを投げ続けても本体の構造の変形は少し（上腕回旋部のアルミ板が約 3° 曲がった）しか生じず，正常な動作を翌日実現できた。[27)28)]よってこの構造は柔軟関節肩義手として使用可能であると判断した。手長の算出式は 0.11×身長で公差±1cm，前腕長の算出式は 0.15×身長で公差±1.5cm，上腕長の算出式は(0.19×身長)－α で公差±1.5cm である。算出式は医用精密工学[22)]より引用したものである。平成 19 年の統計資料によると 20 歳の日本人の男性平均身長は 173.3cm である。よって 173cm の男性の上腕長，前腕長及び手長は，上腕長＝32.87cm，前腕長＝25.95cm，手長＝19.03cm である。この長さを目標に新しい高トルクなシリアル RC サーボモータを用いて肩義手を設計製作した。図 1 に示す MP2[3)]のチップにはルネッサンステクノロジー社の M16 シリーズの演算処理用回路が搭載されている。AD 変換器は 6 チャンネル 5msec で同時にアナログ入力が可能となっている。よって高速な演算，各種関数（三角関数など）の利用が可能となり，顔面方位制御方式[1)23)24)]など各種協調動作制御方式[22)]を動作テスト可能である。スプリクトコマンドはロボット制御用に開発された言語である。

3．製作した 6 自由度肩義手

3.1　肩義手の設計・製作

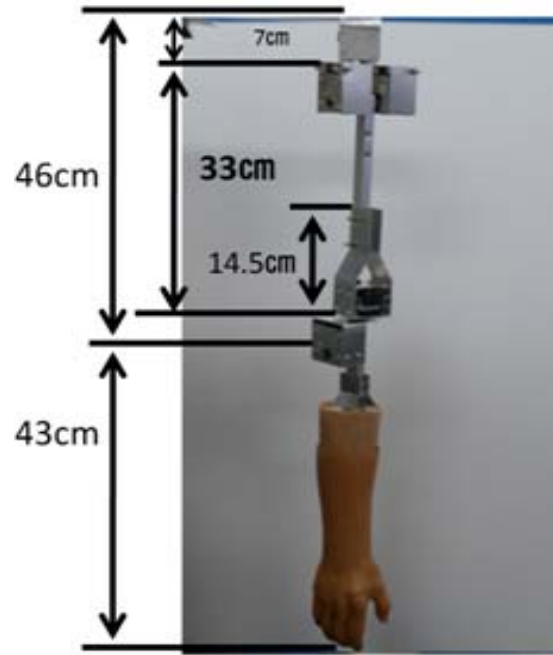



図 3.　6 自由度肩義手の全体図

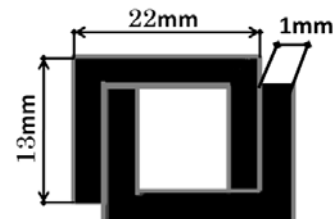



図 4.　上腕挙上の構造，同じアルミチャンネルを重ねて強度をあげている

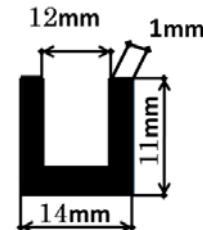



図 5.　エネルギー吸収ボックス用アルミチャンネル

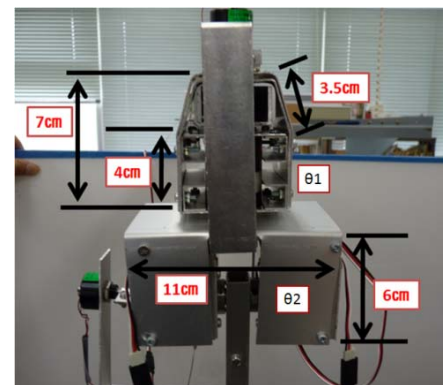



図 6.　上腕水平回転(θ_1)と上腕挙上(θ_2)

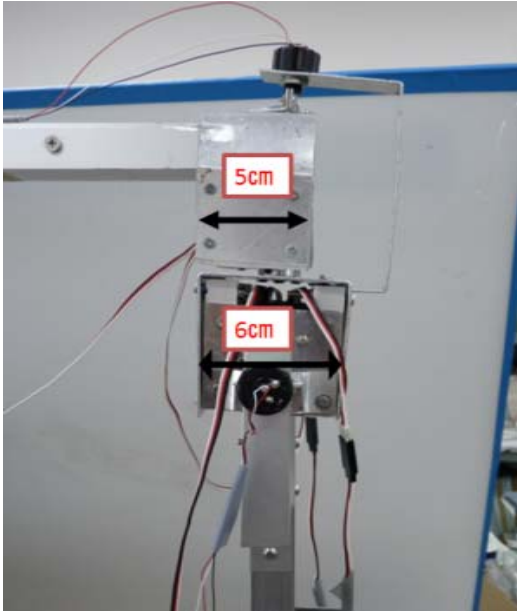



図 7.　図 6 の横から写真

図6と図7に上腕水平回転角(θ_1)と上腕挙上角(θ_2)の前からと横からの写真を示す。製作用にエネルギー吸収ボックス周辺の寸法を記入しておいた。図9〜図12にその他各自由度の拡大写真を示している。垂直方向の回転中心が手先を真下に下ろした状態で一直線上に乗るように工作を工夫した。アルミチャンネルは図5のような厚さ 1mm のものを使用している。エネルギー吸収ボックスにアルミチャンネルを使用するのはモータから刻々と熱エネルギーとして放出される熱を肩義手の動きにより生じた空気の流入により冷却するためである。

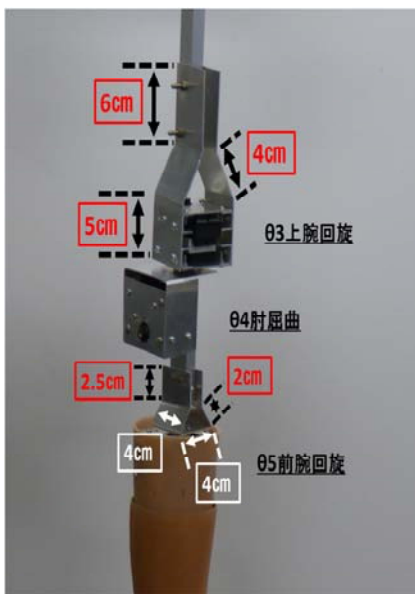



図 8.　θ_3〜θ_5の拡大写真と寸法

図 9.　下から上腕回旋(θ_3)を見た図

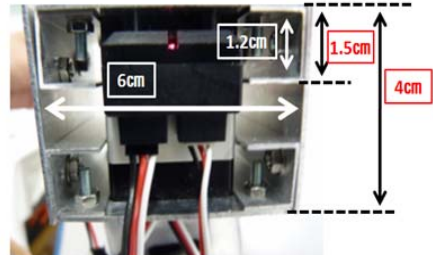
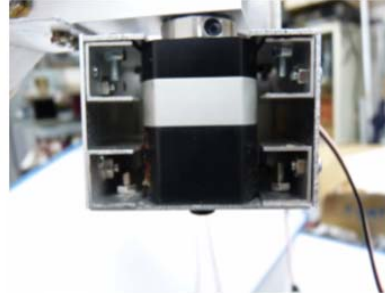



図 10.　下から肘屈曲(θ_4)を見た図

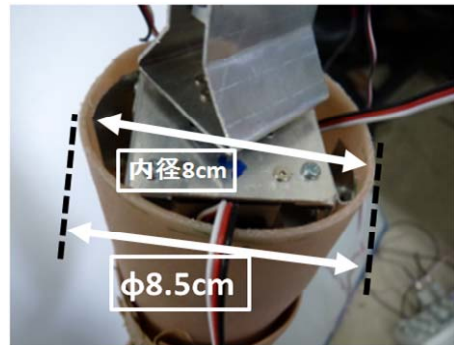



図 11.　前腕回旋(θ_5)とソケットの取り付け方

図 12.　手の開閉(θ_6)に佐藤技研のグローブを取り付けた

前腕部には装飾用肩義手で世界的に有名な佐藤技研のグローブとソケットを用いた。θ_5の前腕回旋には KRS-6003HV のシリアル RC サーボモータを使い，θ_6の手先の開閉には KRS-2552HV のシリアル RC サーボモータを使用しソケットに固定するやり方で試作を終えた。モータから出る指先の骨組を完成させてからグローブを被せるやり方をとった

ので，グローブの手首が通らず一部を仕方なくカットして取り付けた。肩の2自由度の構造は3年間の耐久テストをクリアしてきた先輩の久本君のチームと同様である。ハイパワーなトルクを持つシリアルRCサーボモータを肩から前腕まで6個使用している。全体に使用している軽量なアルミ板はこれまで0.8mmのものを使用していたが，高トルクに耐えるために厚さを1.2mmに強化した。それでも産業用ロボットアームとして±130°まで使用可能か確認する為，θ_1，θ_2の大量データをGL900で測定した。その結果，本実験を始める前にRCサーボモータのアルミ製サーボホーン部とアルミ板の接合部分が故障してしまった。そこでエネルギー吸収ボックスを囲っている枠のアルミの厚さだけはさらに強度を持たせるため1.5mmにした。シリアルサーボ制御方式（RCサーボモータの位置可動範囲は0から270°である。AD変換器の精度が13ビットに改良されたため2^{13}通り(=約8000)に分割できる）を用いているため柔軟関節構造を肩の部分に持つ6自由度肩義手は，滑らかな動作が可能である。また，装飾用グローブの手先は指紋が繊細に作られているので摩擦が大きく，物を掴む際に適した構造である。

図13.　高トルクなシリアルRCサーボモータ6003HV

図14.　小型軽量なシリアルRCサーボモータ2552HV

図13にKRS-6003HVを示した。このシリアルRCサーボモータは2009年度に制作した肩義手のθ_1〜θ_5までの5自由度に全部で6個使用している。これまででトルクは最大であり67kg・cmである。モータの動作角は±135°であり，最大回転角270°となっている。図14はKRS-2552HVのシリアルRCサーボモータである。このモータは小型で軽量な特性を生かした。モータの動作角は±135°であり，最大回転角は270°である。装飾用のグローブ内（θ_6：手の開閉）に入れて使用することにした。

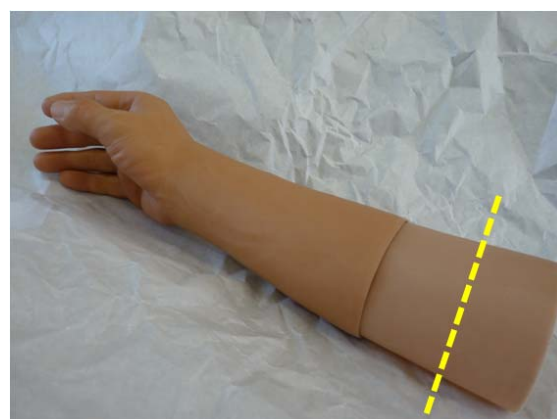
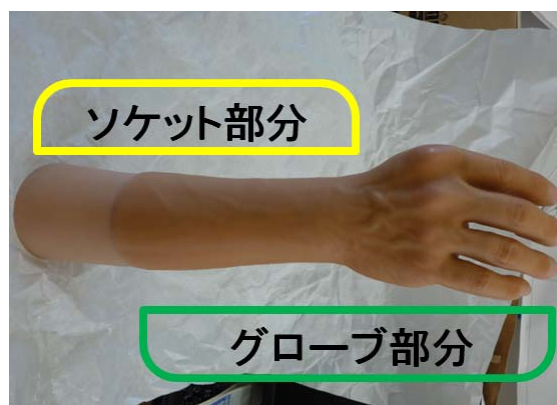



図15.　装飾用グローブとソケット

	グローブ	ソケット	グローブ+ソケット
重さ	145g	90g	235g
長さ	−	25cm(必要に応じて切断−−)	39cm−α

上にそれぞれグローブとソケットのカット前における質量と長さをまとめておいた。このように，前腕部に佐藤技研の装飾用グローブとソケットを使用した理由は，見た目を人間に近いものにして欲しいという患者さんからの要望である。肩義手製作後，前腕部の重量を測ると 500g であった。

3.2 肩義手のシステム構成

3.2.1. システム構成の改良

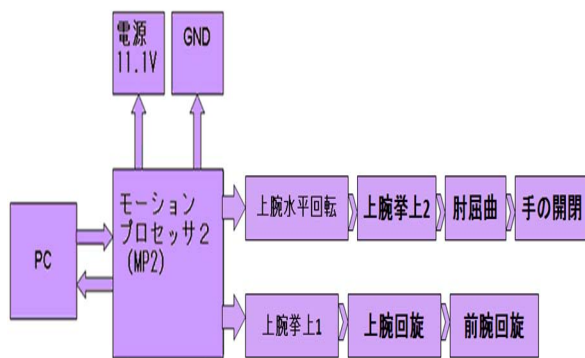
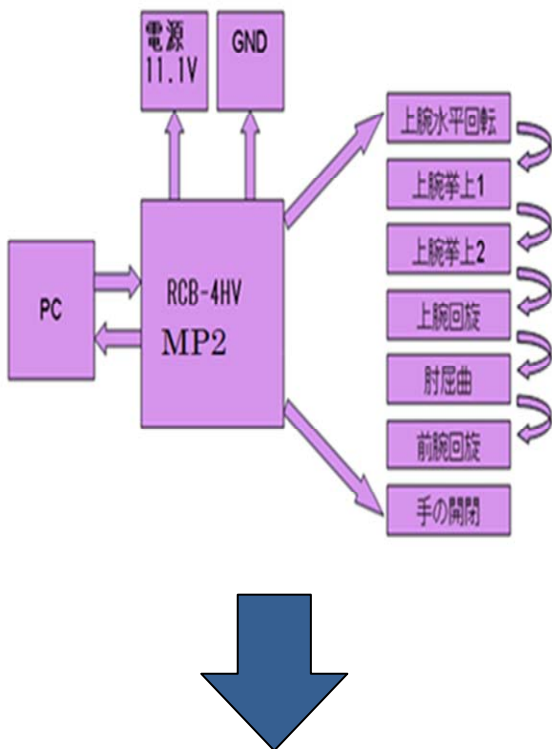



図 16.　シリアル制御方式を用いた MP2HV のシステム構造（数珠つなぎ）

システム制御方式の構成図は，パソコン，電源，近藤科学のロボットコントロールボード MP2 及び 6 自由度に必要な 7 個の RC サーボモータである。RC サーボモータに対応したロボットコントロールボードを PC に接続し，7 個の RC サーボモータを同時に協調動作させせることが可能である。2009 年度には MP2HV で簡単な日常動作を再現することにした。2008 年度に製作した肩義手のスプリクトプログラム（MP2 用に開発されたロボット用言語）はペットボトルの水を飲む動作であった。スプリクトプログラムで今回作った動作は,「皿の上にある食べ物をフォークで突き刺してたべる」である。ハイビジョンの動画で自然な動きになっていることを確認した。RCB-4HV（シリアル通信 Ver1.3 に対応）は通信速度が MP2（シリアル通信 Ver1.2 に対応）の 10 倍程度になり，高性能である。しかし，完全に使用方法を理解できておらず，最新版なので近藤科学の他の使用方法用のマニュアルができていなかったので今まで使っていた MP2 で確実に動作するやり方を選択した。ただ，これまでと違い，シリアルサーボモータを肩義手に使用したので数珠つなぎという方法を利用した。数珠つなぎはシリアル RC サーボモータの最大の特徴と言えるであろう。図 16 の上の方法は始めに数珠つなぎをしようと考えたときのシステム構造であるが，図 16 の下のようにポートを 2 個使用するようにし，一つのポートに ID1,2,3,4 と，もう片方のポートに ID1,2,3 と θ_1 から順に設定していく方がより効率の良い通信方式である。協調動作させるには良い構造であるので，滑らかに動作するには下の構成が推奨される。

3.2.2. RC サーボモータの制御方法

図 1 に示したようなモーションプロセッサ 2HV のコントロールボードで肩義手とパソコンを接続する。今回は MP2Editor という図 17 のようなスライドバー画面で制御した。個々のモータを一個ずつ制御でき，13bit に対応した高精度な制御基板である。マニュアルによると [3]7500 をモータの 0° と考えニュートラルとしている。－4000(－135°)～4000 (+135°)の 8000 通りで数値入力するか，スライドバーを 2.5° 間隔で動かすかの方法がある。例えば，－889 とスライドバーを左へ動かすと－30° モータを動かすことができ，＋3852 へとスライドバーを右へ動かすと＋130° 動かすことができる。モータはマウスでスライドバーを動かし終え，左クリックを放した瞬間ステップ応答の開始信号となり，最高スピードで目標値まで到達する。

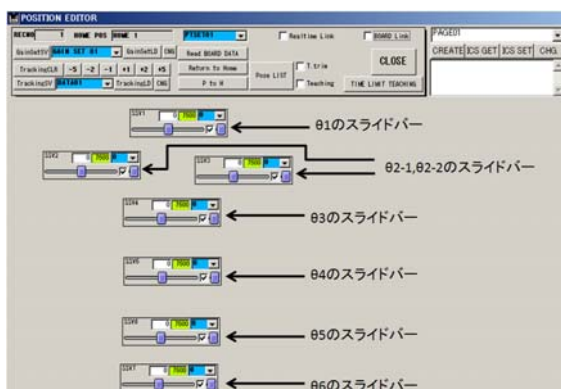
図 17.　制御用のスライドバー画面

3.2.3. 回転式ポテンショメータの特性

図 18.　CP-2FB(b)の構造

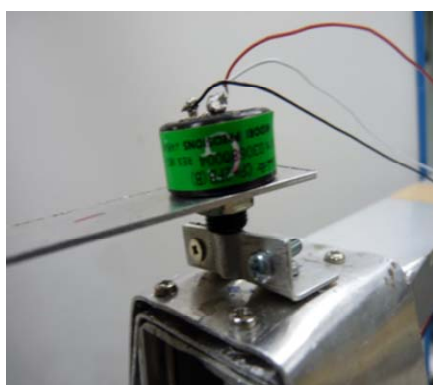



図 19.　CP-2FB(b)圧着の様子

緑測器のポテンショメータは，5V の電源とし ており，回転角が最大の 340° になると 5V に達する様にしている。分度器を用いて入出力特性を求めた。図 19 に示すように，ポテンショメータの回転軸を 2 枚のアルミ板を変形させたもので，圧着することにより複雑な外力に柔軟に対応しながらデータが取れるように工夫した。

4.　実験方法

4. 1　肩の 2 自由度に取り付けた回転式ポテンショメータとステップ応答

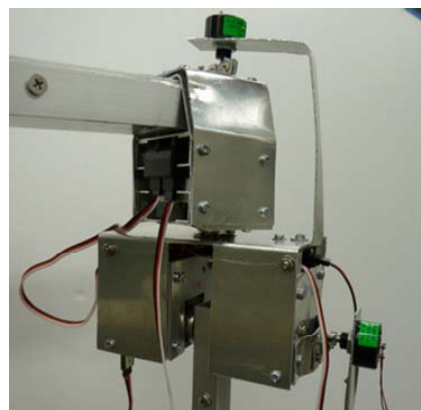



図 20.　回転式ポテンショメータを取り付けた様子

図 21.　GRAPHTEC GL900

回転式のポテンショメータは図 19 に示す様に θ_1（上腕水平回転角度）と θ_2（上腕挙上角度）に取り付けてステップ応答波形を測定することにした。回転式ポテンショメータはアルミの圧着により軸のみを固定して半田付けした配線の付いた本体ごと回転させるように取り付けている。ポテンショメータの軸はモータの回転軸の真上になるよう正確に取り付けを行った。GL900 の分解能（電圧軸を意味する）は 16 ビットに対応しており，画面の縦軸を電圧軸とすると 2^{16} 分割できる。

① θ_2の角度を 0～100.1° とした時の θ_1=0 の測定項目について説明する。

θ_1は一定の値, 例えば θ_1=0° に対応しているはずであるが腕の姿勢の状態によっては新しい θ_1=

1°などに変化している可能性がある（多くのデータの中に該当するものがあった)。また，ステップ応答の影響で変動波形が観測されている。変動が±2%以上の場合は，変動が続く時間は±2%の整定時間の定義を使うことができる。±2%以内の場合は元の値と新しい値に変化するまでの時間とその時どの程度の変動が起きているのか理解すれば良い。ポテンショメータの取り付けを肩の2自由度にしているので，図21のGL900の2チャンネル使用し，上腕水平回転角と上腕挙上角の出力信号を変動波形としてデータ化する。肩義手は非常に多くのねじを用いて独自に開発した部品を結合したものなので，一動作ごとに各関節に加わるトルクが変化するため，ねじ締めの強さが少しずつ変化し，その結果肩義手の各パートの重心位置が微妙に変化するため上記のような初期位置の変動が起きると予想される。

5. 動作実験

5.1　スライドバーを使用し肩義手のステップ応答波形を求める実験（負荷300g）

5.1.1. 上腕回旋角（θ_3）30°肘屈曲角（θ_4）90°での上腕挙上角運動（θ_2=0～120°）

図22～24に示した変動波形は, 水300gのペットボトルを肩義手の手先に持たせ, GL900で観測したステップ応答波形である。このデータを取り上げた理由は，立上り時に肩義手が到達位置まで動作した後，ポテンショメータの誤差による振動以外ほぼ振動が起こっていないからである。ロボット工学においてステップ応答波形はオーバーシュートやアンダーシュートを繰り返しながら目標値に安定していくのが普通である。水を持たせていないとき（負荷なし）でも振動はあったが，300gの負荷の時に振動が減ったということである。従って，この肩義手においては日常動作で物を持った状態のほうが物を持ち上げるとき安定することがわかった。対して，立下り時には，やはり最高スピードで動作する肩義手は重力の影響を大きく受け，はじめ大きなアンダーシュートの起こる振動波形となった。しかし，肩義手の補強をした後であるので 2sec 程度で振動は止まっている。肩義手の取付台が重力の反作用により大きく振動してしまう為，目標値のアンダーシュートやオーバーシュートが大きくなってしまう。より高価な取付台を用いれば反作用の影響を少なく出来る。

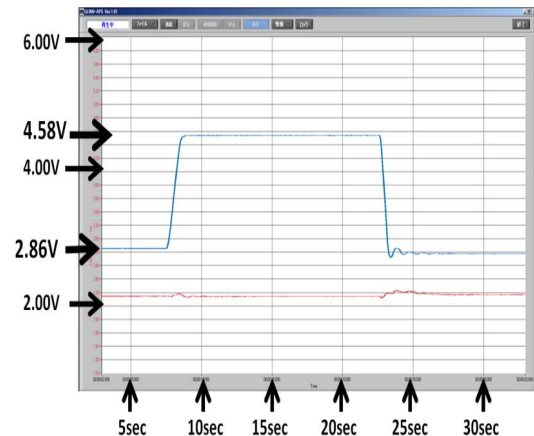



図22.　上腕挙上角0～120°のステップ応答

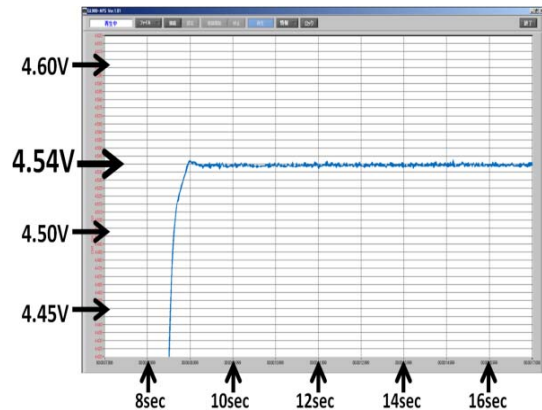



図23.　立上り特性の拡大図

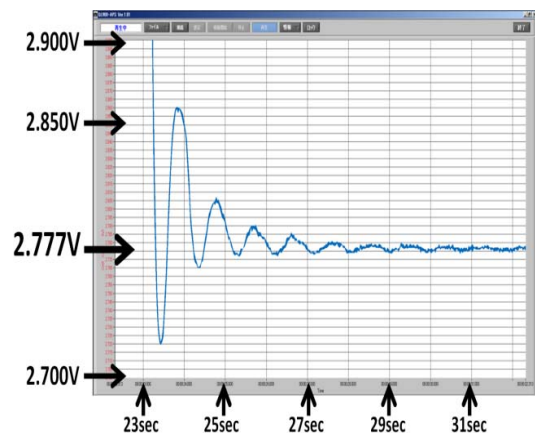



図24.　立下り特性の拡大図

5.2　スライドバーを使用した肩義手の動作実験（負荷なし）

5.2.1. 上腕挙上角（θ_2）80°での上腕水平回転運動（θ_1=0〜−90°）

下に示したステップ応答波形は，動作実験で失敗した例の一つである。

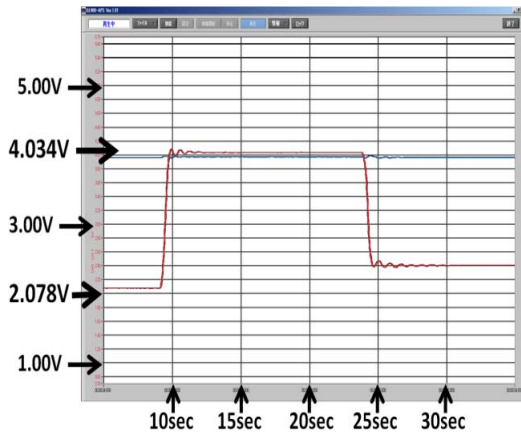



図 25.　　上腕水平回転角 0〜−90°の
ステップ応答

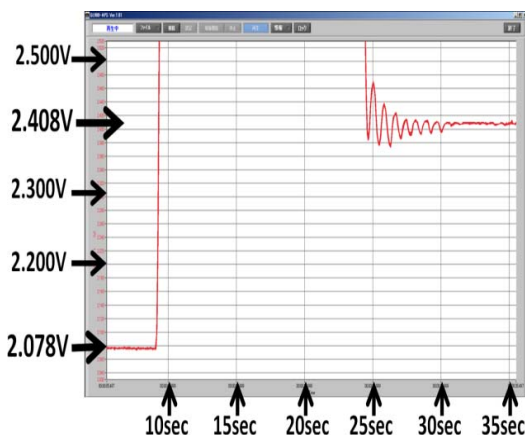



図 26.　　θ_1=0°時のずれ
（ポテンショメータ滑り）

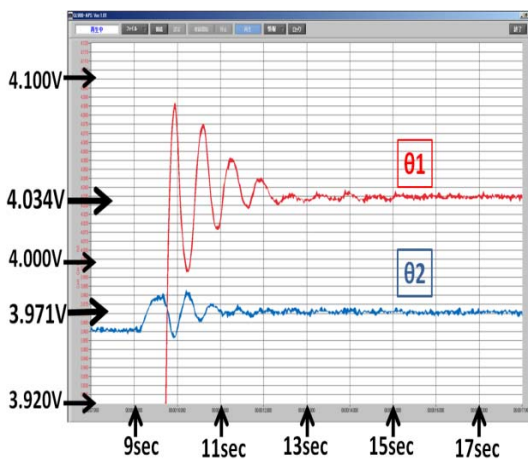



図 27.　　立上り特性の拡大図

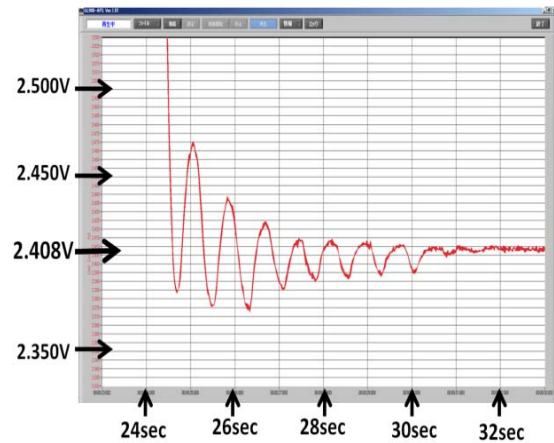



図 28.　　立下り特性の拡大図

立上り特性や立下り特性ではオーバーシュート，アンダーシュートの後振動が止まる様子が見られたが，図 25 で 0°の位置の立上り前と立下り後を図 26 に拡大して見比べると明らかに電圧の初期位置がずれていた。これは，ポテンショメータの軸が滑っていると見て間違いないと思われる。ポテンショメータはアルミとアルミの変形（回転軸の部分はアルミ板を半円の形にし，上下よりサンドイッチの様に回転軸を挟み，両側のナットとビスでしっかり止める圧着という方法を用いている）させた構造物で圧着して取り付けている。この取り付け方であれば，上腕挙上のポテンショメータはほとんど問題ないが上腕水平回転のポテンショメータは激しいエネルギー吸収ボックスの弾性変形によってアルミが変形し，軸を固定したままのとどめておくことが困難となる。特に，少しでも圧着部分のネジがゆるんでいると滑る可能性はより高くなる。現在の段階ではこの取り付け方以上のものは考えられないのでネジを測定前にこまめにしめ直すことで実験を行った。図 27 は θ_1 のステップ応答の目標値での過渡現象がデータ化できている。θ_1 のステップ入力信号により肩義手が動き出すと同時に θ_2 も過渡現象を起こし最初の位置より変化していることがわかる。これが θ_2 の弾性変形量を示している。

6.　実験結果と考察

第一にやるべきことは，θ_1(上腕水平回転角)の定常偏差の測定を再度行うことである。変動波形では明らかに目標角度よりも大幅に動作角が進んでおり，ポテンショメータの性質と関連付けながら実験を行う予定である。θ_4(肘屈曲角)の補強も考えている。激しい動きによって θ_4 のボックスと θ_3（上腕回旋角）の接合部分が，θ_2（上腕挙上角）の次に負荷がかかるらしく，実験を繰り返す度に少しずつ歪みが大きくなってきている。ここもエネルギー吸収ボックスと同様, 1.5mm にアルミを厚くする必要があると考えている。手先に関しては，モータのトルクの改善（トルク UP）および，グローブの形を修正（始

めから手を閉じるだけで中指と親指が合わさるような形をオーダー）する必要がある。これで 500g のペットボトルを持たせ，最高スピードで動かしてもペットボトルを離す心配はない。エネルギー吸収ボックス用のアルミ板の厚さは最初 1.2mm で設計製作した。産業用ロボットへの応用を予定しているのでホームポジションを 0 度として（腕の力をぬいてだらりとした楽な姿勢）θ_1は 0 から 90 度，θ_2は 0 から 120 度のステップ応答波形を GL900 でサンプリングタイム 10μsec，垂直分解能は 16bit で測定した。また，0 から－120 度まで変化させた。θ_3は 50 度から－50 度まで同様の測定を行った。θ_2は 0 から 130 度と 0 から－120 度まで動作させた。θ_5は－135 度から 135 度まで動作させた。θ_6のトルクは 14kg･cm と小さいのでグローブをのけて－135 度から 135 度まで動作させた。繰り返し動作させた結果θ_2のエネルギー吸収ボックスが金属疲労により壊れた。そのためアルミの厚さを 1.5mm に変更し，設計製作を再度行い，実験を継続した。実験中に肘の部分の強度不足が判明し構造も改良した。具体的にはアルミ板の端をＬ字型に少しの高さ直角に曲げることにより強度が向上した。図 29 にスクリプトでプログラムを作成した「フォークで肉を繰り返し刺しながら食事をする」というスクリプトプログラム [3]を実行した場合のθ_2の出力波形を示す。振動のない滑らかな動作になっていることが分かる。目標値近くまで最高スピードで動くかを表す制御量がストレッチ [29]である。最大 127（標準 60）に設定されている。ストレッチを 120 に上げて産業用ロボットモードでも同様なデータとなることを確認した。

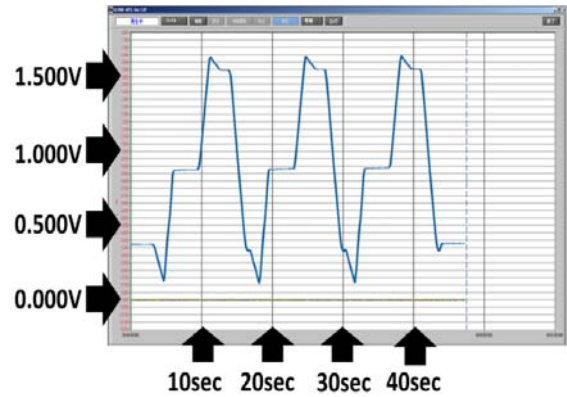



図 29.　食事動作の波形例(ストレッチ 120)

以下に上記内容を制御工学の立上り時間，立下り時間，整定時間（±5%，±2%），定常偏差を定義に従い測定データを GL900 と USB ケーブルでパソコンにデータを取り込み，拡大図をプリントアウトして上記パラメータを正確に測定した。エクセルの測定ポイントが大きくなっているデータは改良後のデータである。それ以外は金属疲労が少ない状態での各パラメータの値である。ページ数に制限があるためすべてのデータを論文に示すことはできないので代表的データをエクセル表示する。

6.1　立上り時間・立下り時間

ステップ応答で立上る時の 0.1～0.9 に対する時間を立上り時間といい，立下る時の 0.9～0.1 に対する時間を立下り時間という。図 30 にステップ応答波形の一例（θ_4=90°　θ_2＝0～120°負荷なし，ストレッチ 120）を示す。また，図 31 に立上り時間を測定するための拡大図を示す。ただし，エクセルでグラフ化した波形の大きな三角印▲はθ_4改良後のデータである。

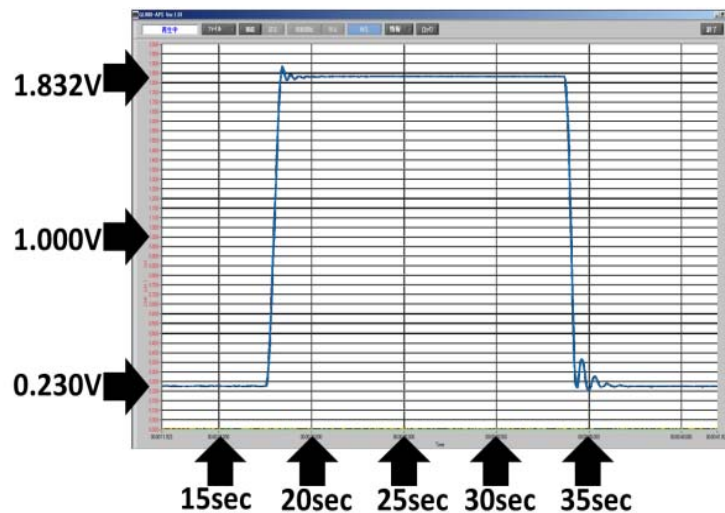



図 30.　θ_4＝90°　θ_2＝0～120°　負荷 0(ストレッチ 120)

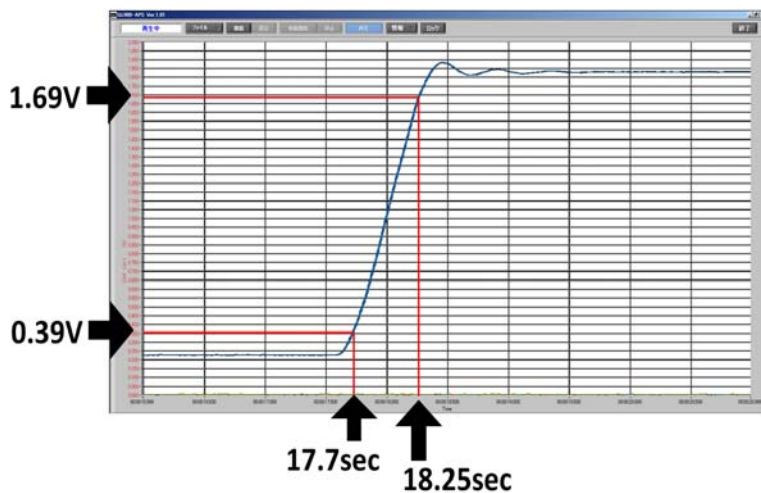



図 31.　　立上り時間 0.1〜0.9

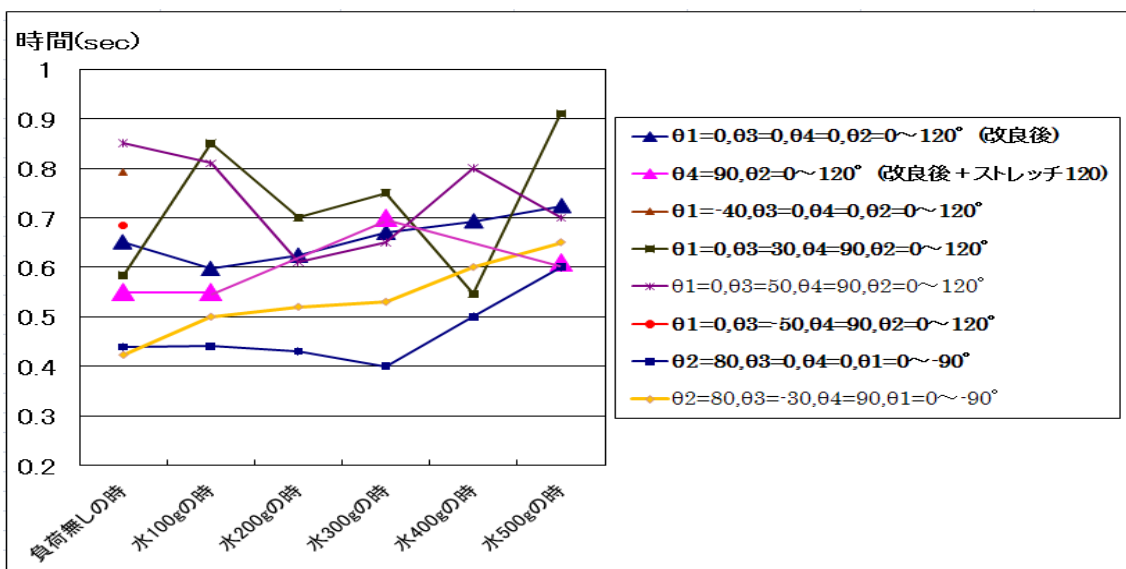



図 32.　立上り時間(負荷 0〜500g)

図 33 にステップ応答波形の一例（θ_4=90°　θ_2＝0〜120°　負荷 100g）を示す。また，図 34 には立下り時間を測定するための拡大図を示す。

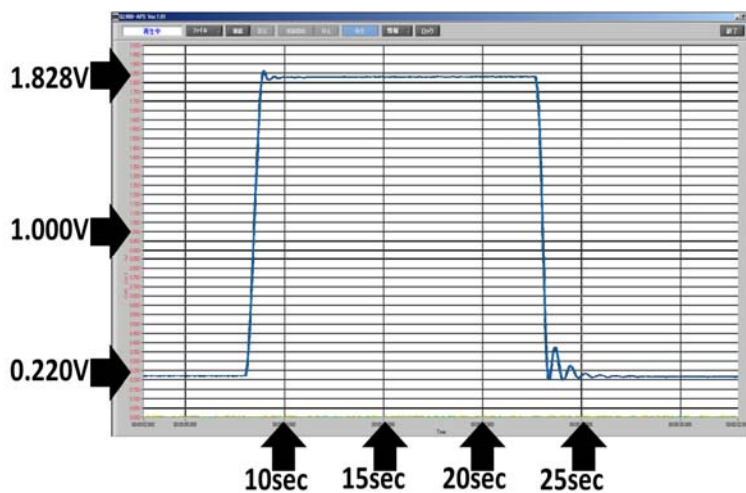



図 33.　θ_4=90°　θ_2＝0〜120°　負荷 100g(ストレッチ 120)

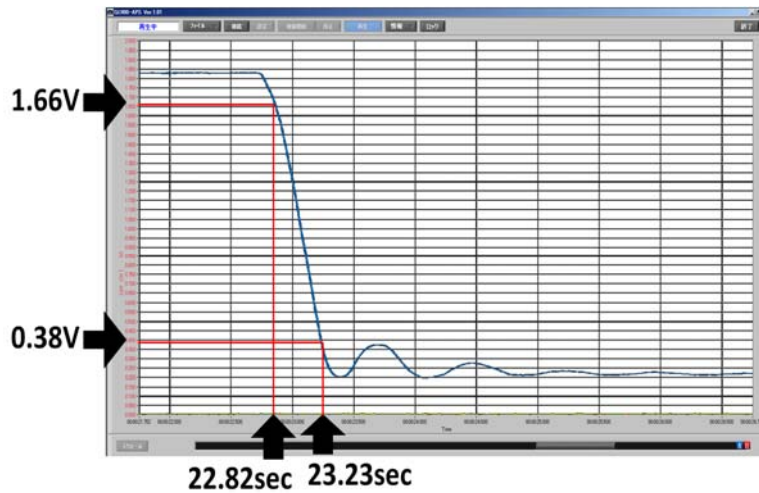



図 34.　立下り時間 0.9～0.1

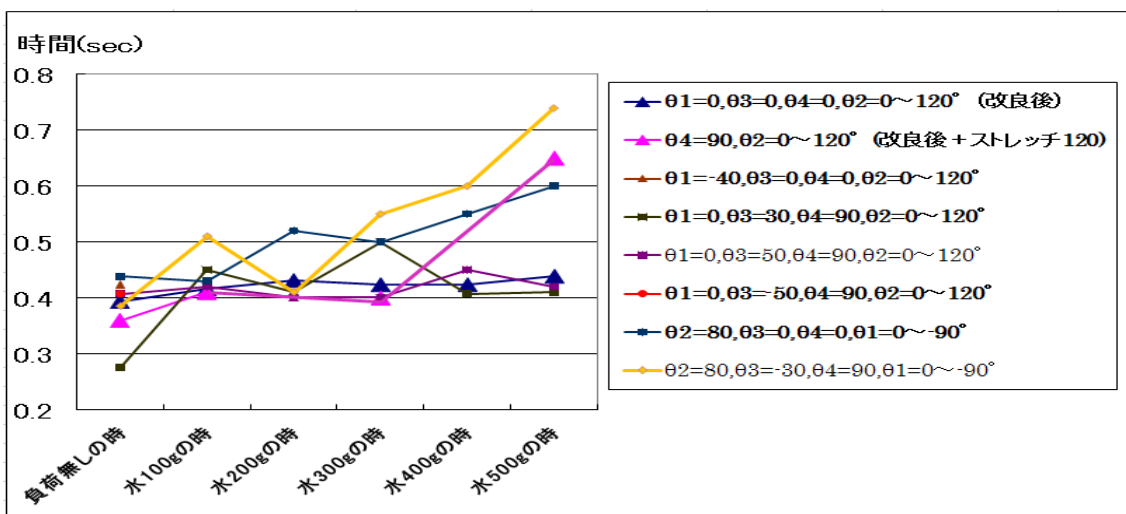



図 35.　立下り時間(負荷 0～500g)

図 32 に上腕挙上運動(θ_2)と上腕水平回転運動(θ_1)の立上り時間を負荷 0～500g まで測定し，まとめたグラフを示す。θ_2は PWM（Pulse Width Modulation:パルス幅変調）制御方式では考えられないようなことが起こっていた。シリアル（コンプライアンス）制御方式であるとモータの発熱[27]（最高温度設定値 255, 標準設定値 128 で使用している）による無理が生じないように自動的に制限がかかり，目標値まで到達せずに停止するように設計されている。例えば，図 45 でθ_4=90° でθ_2＝0～120° までステップ応答させた時，定常偏差が負荷を 0～500g まで変えた時, 定常偏差が 11° から 9.5° （約 1.5° の変化である）ぐらい変動しているだけである。最終的に立上り時間は負荷に関係なくほぼ一定で停止しているのがわかる。図 32 でθ_4=90° ，θ_2＝0～120° までステップ応答させた時の立上り時間は約 0.5 秒～0.7 秒の間に収まっている。θ_1の運動では上腕挙上 80° の状態での横方向の動きであるので，負荷の影響を少し受け，負荷を大きくすると立上りには時間がかかった。図 35 は立下り時間をまとめたグラフより θ_2の運動では負荷が大きくなると重力の影響を受け，0° に戻る動作が加速してしまいそうであるが，モータは自動でその影響を受けないようにスピードを弱め，負荷による時間の変化はほぼないに等しい。対して，θ_1の運動の立下り時間は上腕挙上を 80° 挙げた状態であるので横方向の動きには負荷の影響を少し受け，負荷を大きくすると時間がかかっていた。立下り時の振動には肩義手の取り付け台の振動が含まれているため整定時間(±2%)が長くなっている。

6.2　整定時間±2%

6.2.1. 上腕挙上運動（θ_2）の整定時間±2%

整定時間(settling time)とは，ステップ応答が定められた許容範囲内（±2%や±5%）に入り，この時点以降は再び許容範囲を越えなくなるまでの時間である。

図 36 にステップ応答の一例（θ_4=90°　θ_2＝0〜120°　負荷 300g）を示す。また，図 37 に立上り整定時間を測定するのに必要な拡大図を示す。

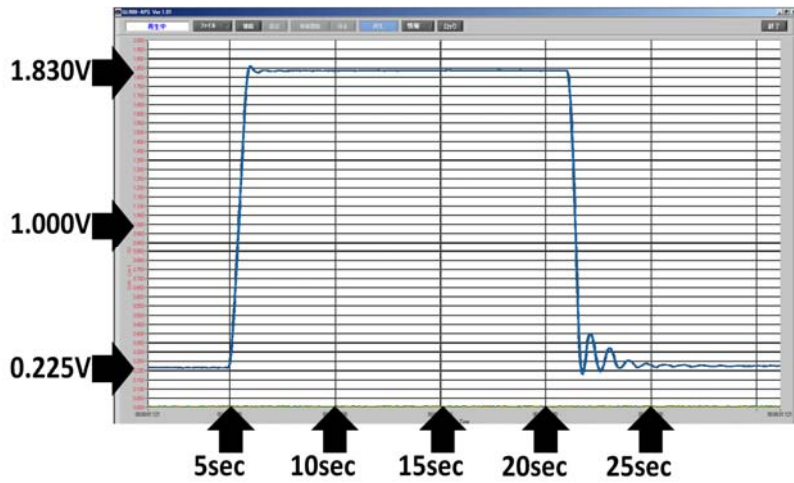



図 36.　θ_4=90°　θ_2＝0〜120°　負荷 300g(ストレッチ 120)

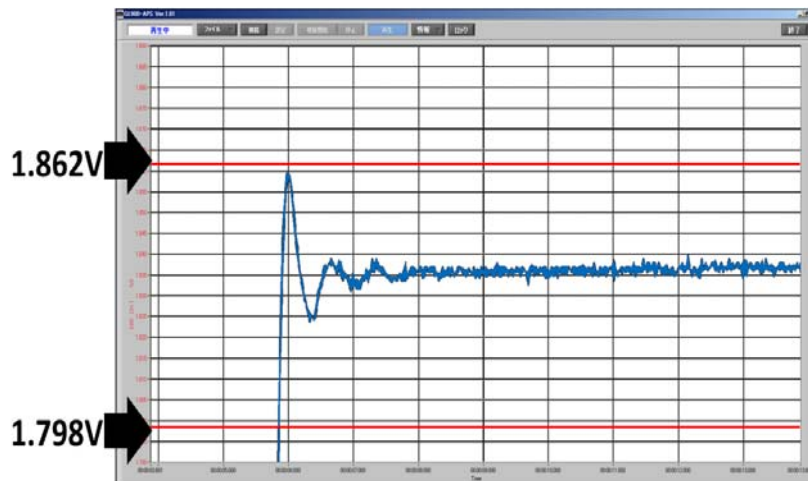



図 37.　整定時間±2%範囲

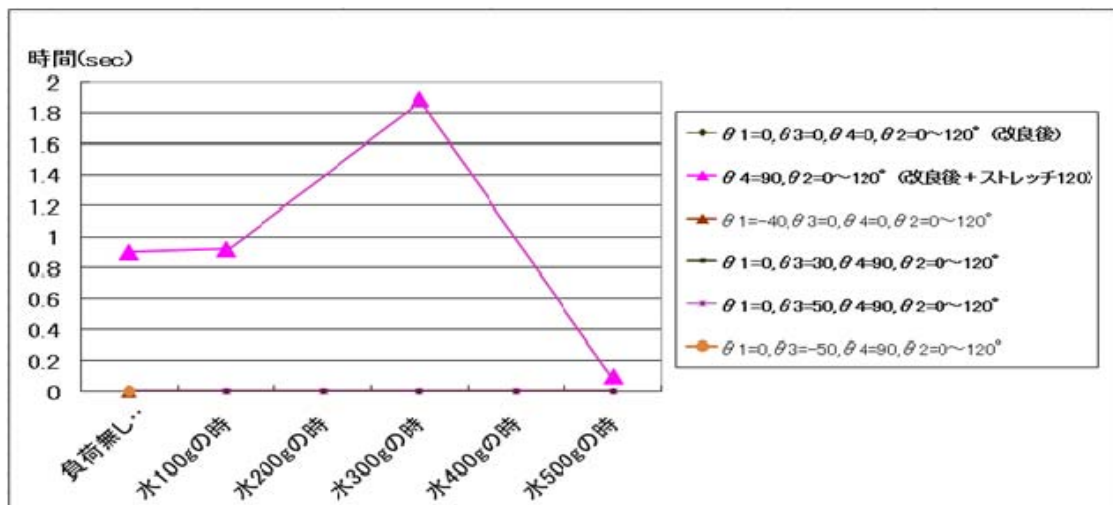



図 38.　θ_2の立上り整定時間±2%(負荷 0〜500g)

図 39 にステップ応答の一例（θ_4=90° θ_2=0〜120° 負荷 500g）を示す。また，図 40 に立下り整定時間を測定するのに必要な拡大図を示す。

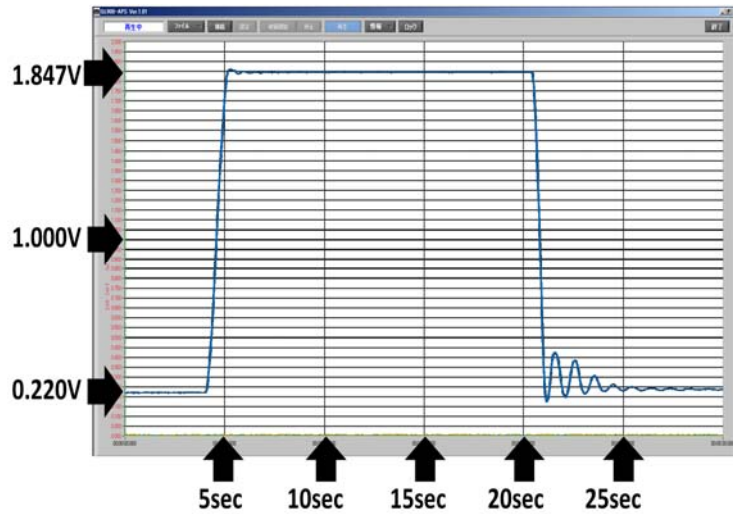



図 39. θ_4=90° θ_2=0〜120° 負荷 500g(ストレッチ 120)

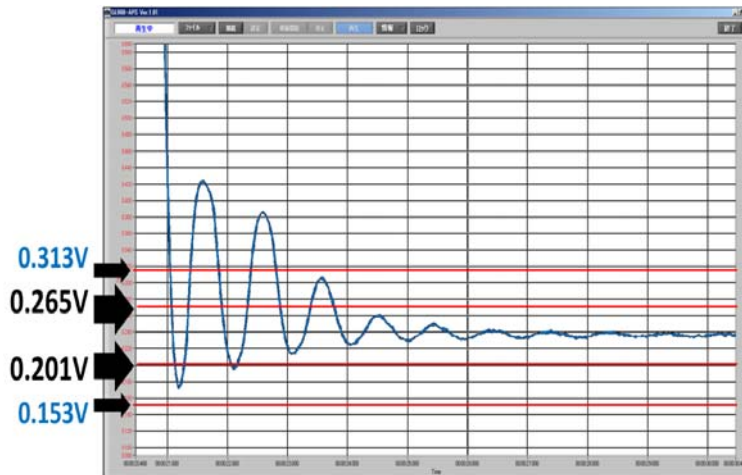



図 40. 整定時間±2%範囲

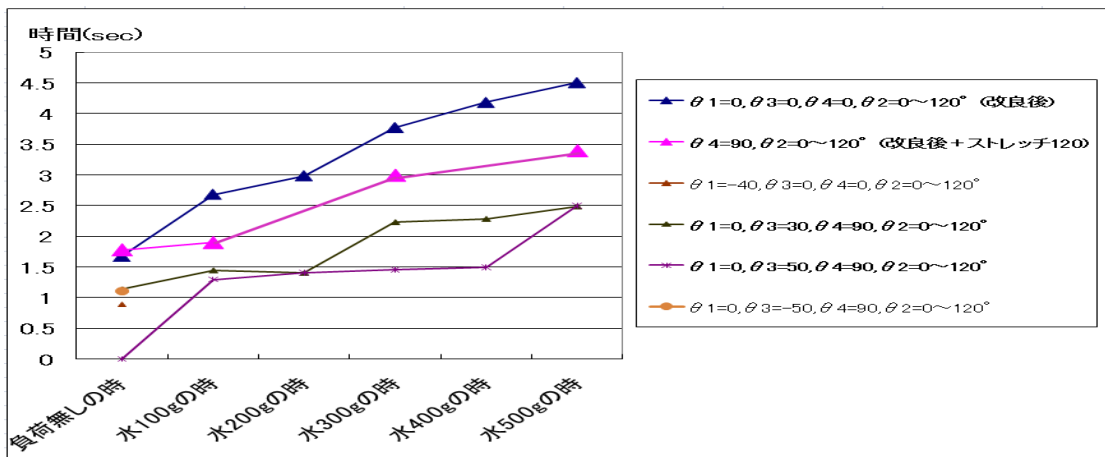



図 41. θ_2の立下り整定時間±2%(負荷 0〜500g)

上図は±2%の整定時間だけだが，±5%の整定時間はすべて 0 秒以内に収まっていたので省略をした。立上り整定時間が±2%の時，図 38 のようにストレッチを 120（産業用ロボット用）で負荷が 300g の時は 1.9 秒であるが，残りの負荷 500g までのデータの測定結果は，すべての場合において 1 秒以内に

収まった。この肩義手の精度の高さを証明することができた。図41はθ_2の立下り整定時間の結果だが，重力の影響を受け，肩義手の取付台が反作用で大きく振動する為，整定時間は負荷が大きくなるにつれて長くなっていることがわかる。

6.2.2. 上腕水平回転運動（θ_1）の整定時間±2%

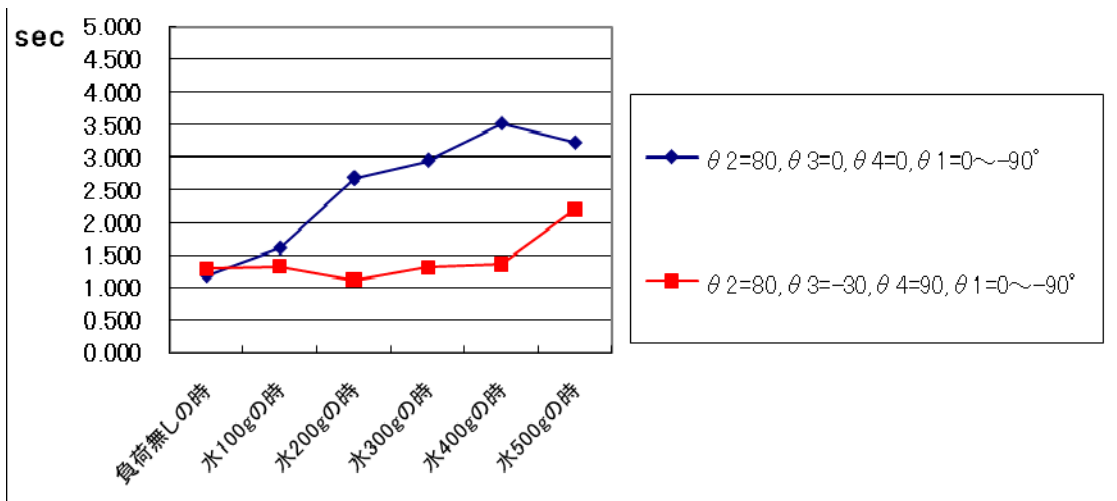



図 42.　θ_1の立上り整定時間±2%(負荷 0～500g)

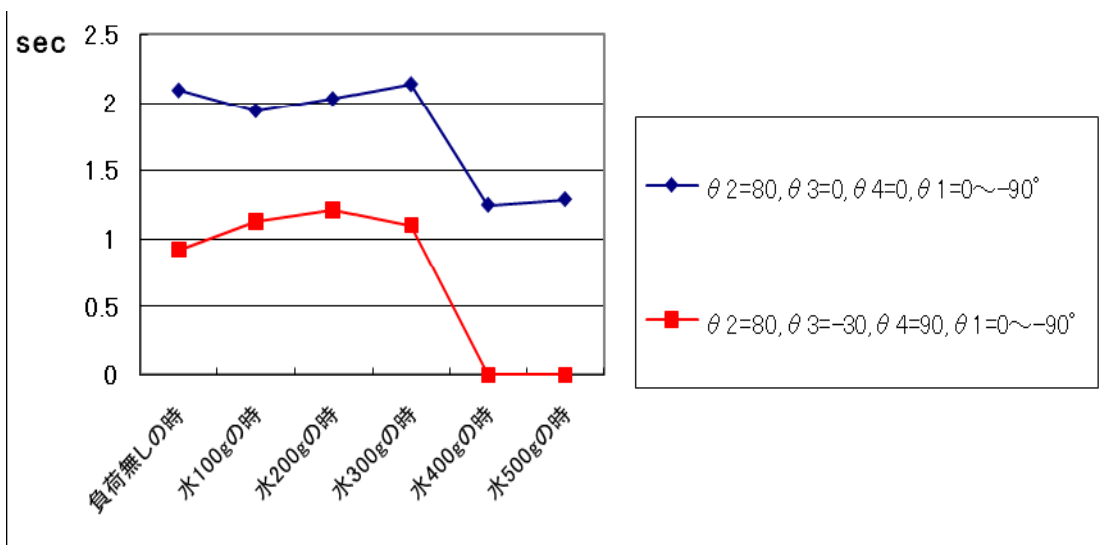



図 43.　θ_1の立下り整定時間±2%(負荷 0～500g)

これら 2 つの図は，θ_1の横方向の動きを解析したものである。定常偏差でポテンショメータの滑りを確認したデータもあるので，正確なデータとは言い切れない。しかし，重いものを運ぼうとするとき，同じトルクで動かそうとするとスピードは弱まることは言うまでもない。その要因から整定時間は400gや500gのものを運ぼうとすると図35の立下りの変動波形よりすぐに許容範囲に収まっていることが分かる。

6.3　定常偏差について

はじめに定常偏差の計算方法を示しておく。ポテンショメータの回転角度とGL900よりわかる電圧から，目標角と実際の動作角の差分を定常偏差とする。例えば，図22に示す5.1.1『負荷（水）300g，上腕回旋角30°肘屈曲角90°での上腕挙上運動（θ_2=0～120°）』の場合の立上りで計算してみる。下が2.86V，上が4.58Vなので出力は，4.58−2.86=1.72Vである。求めたい角度をXとおき，電圧を角度に変換する計算式は，

角度X°　：　出力V　＝　340°　：　5V

より，出力に1.72Vを代入すると，X : 1.72=340 : 5　から　X=116.96となる。
目標角は120°なので120−116.96=3.04。定常偏差は3.04°となる。

6.3.1. 上腕挙上運動（θ_2立上り時）の定常偏差

図 44 にステップ応答の一例（θ_4=90°　θ_2=0～120°　負荷 300g，ストレッチ 120）及び，定常偏差を求めるための図を示す。

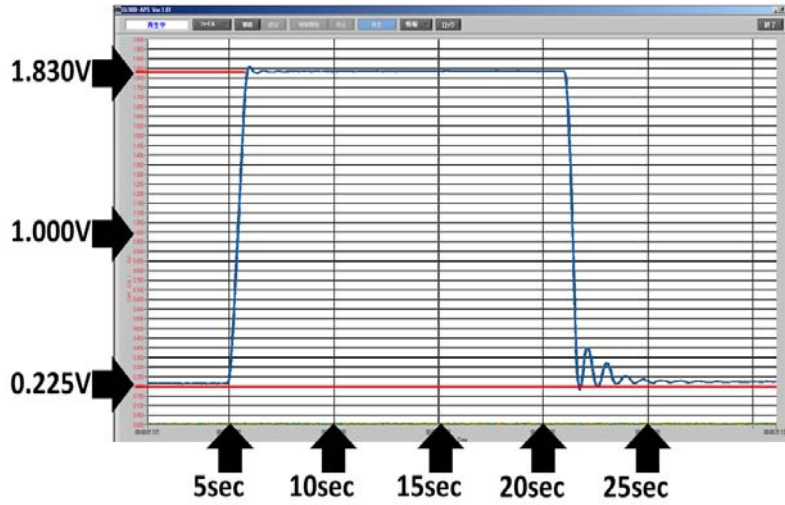



図 44.　θ_4=90°　θ_2=0～120°　負荷 300g(ストレッチ 120)

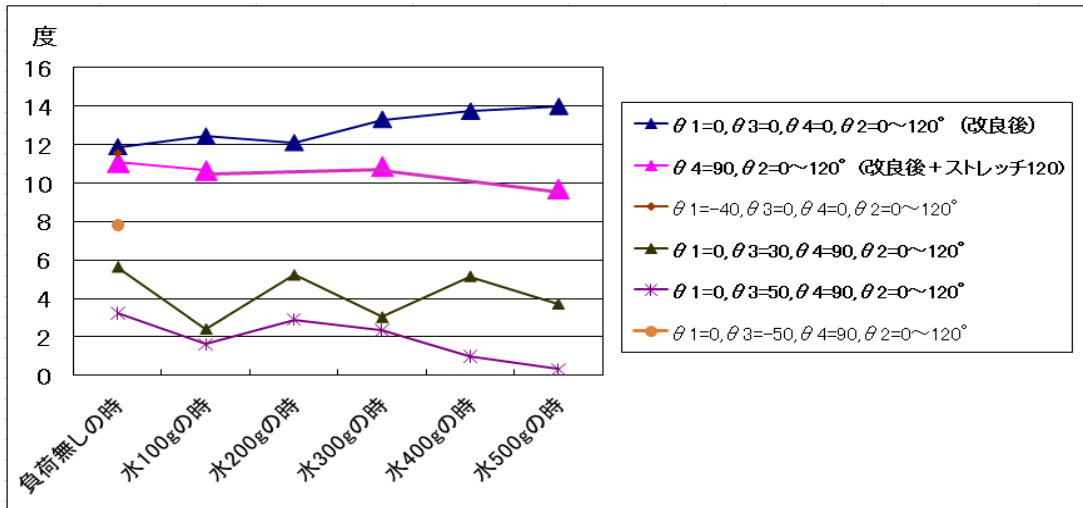



図 45.　θ_2の定常偏差（立上り）(負荷 0～500g)

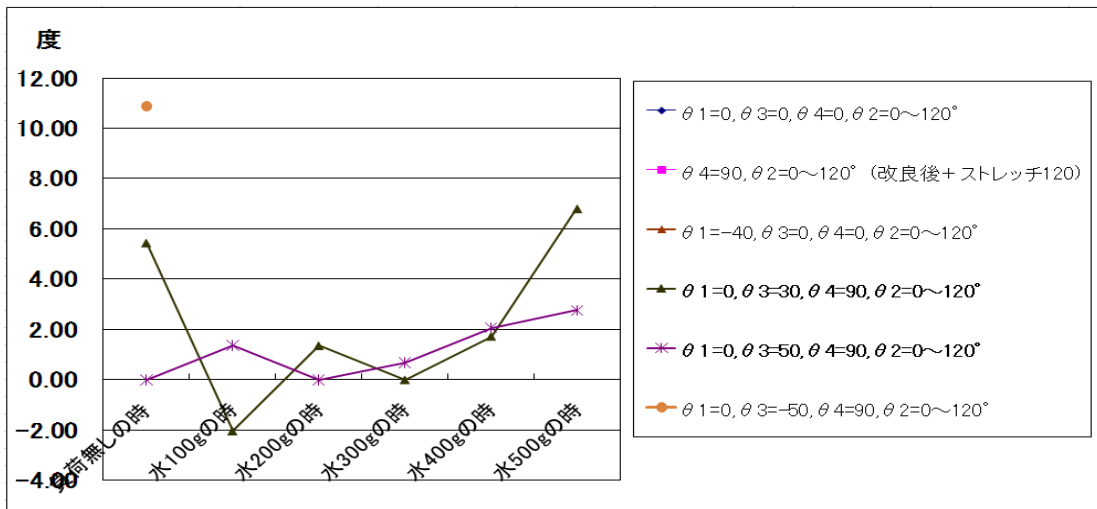



図 46.　θ_1（上腕水平回転）定常偏差（立上り）(負荷 0～500g)

図45は上腕挙上角(θ_2)を0→120° までステップ応答させ最高スピードで動かせたときの定常偏差（負荷0～500g）であり，図45はその時の θ_1 の定常偏差である。図45よりわかることは，緑の線(小さい三角印)で示した上腕回旋角30° 及び肘屈曲角90° 曲げた状態の上腕挙上の定常偏差が 2° ～6° の間にあり，ほぼ目標角まで達しているということである。さらに負荷なしであっても水500g を持たせた状態でも目標角に近いということもわかる。紫の線（星印）で示した上腕回旋角50° の時も同様である。この2つの状態は特に人間の生活の机上動作に近い角度である。従って日常動作を行う時に最も安定した動きができるということである。図46の緑（三角印）と紫（星印）は図45の θ_2 の動きに対応して θ_1（上腕水平回転角）がどの程度変形するかを示している。上腕挙上を動かせた瞬間強い振動とエネルギー吸収ボックスの弾性変形が生じるが目標値に手先が移動できれば図45図46のような弾性変形量となる。

6.3.2. 上腕挙上運動（ θ_2 立下り時）の定常偏差

図47にステップ応答の一例（ θ_4=90° θ_2=0～120° 負荷500g，ストレッチ120）及び，定常偏差を求めるための図を示す。

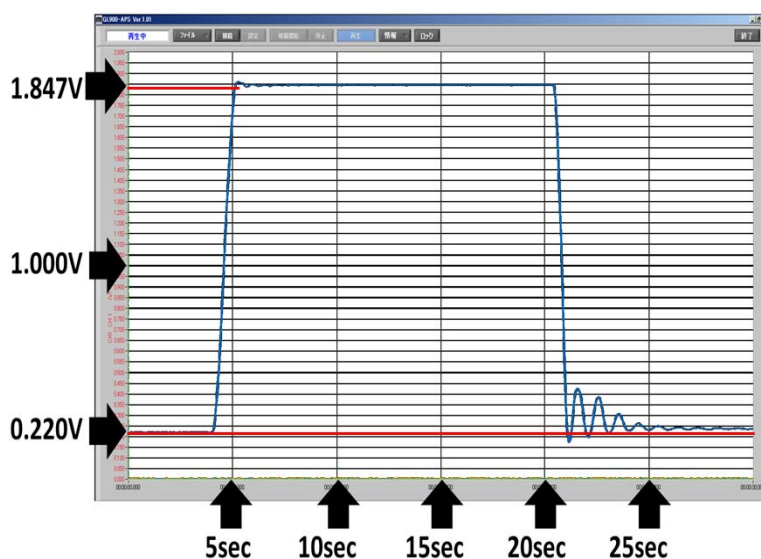



図47. θ_4=90° θ_2=0～120° 負荷500g(ストレッチ120)

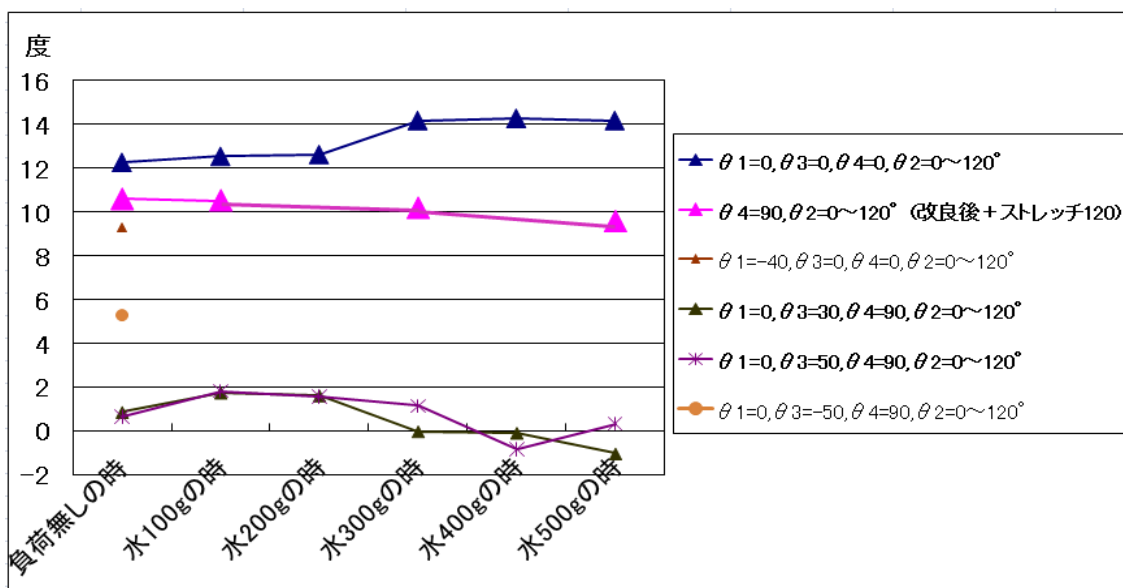



図48. θ_2 の定常偏差（立下り）(負荷0～500g)

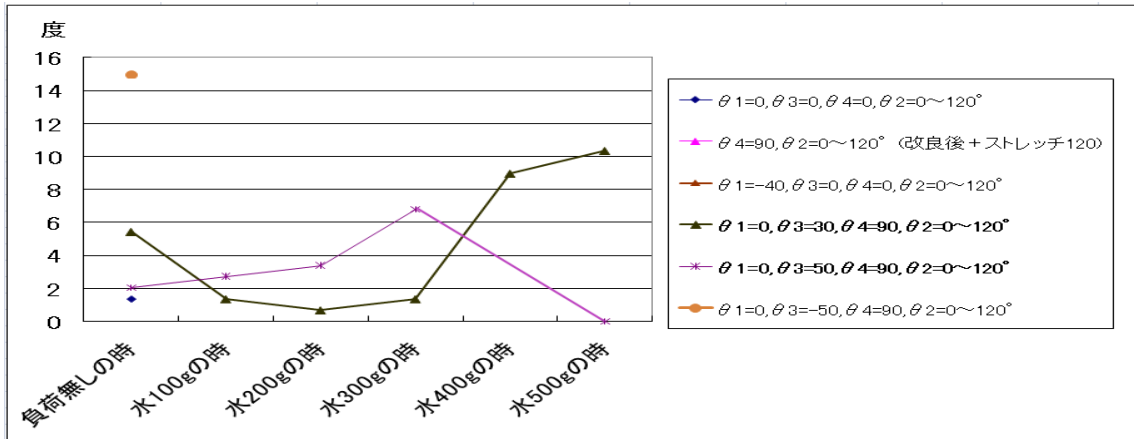



図 49.　θ_1定常偏差（立下り）(負荷 0～500g)

図48は上腕挙上を120→0° までステップ応答により最高スピードで動かせたときの定常偏差であり，図49はその時のθ_1の定常偏差である。図47に示すように，θ_1=90° で負荷500g で（ストレッチ120）で定常偏差は約9.5° ぐらいである。立下り時のオーバーシュートは少なく，一定時間以内で目標値に振動無しで静止している。また、立下り時には500g の負荷を持っている為と，肩義手の取付台の強度に問題があり図41に示すように±2%の制定時間は約4.5秒以内である。柔軟関節6自由度ロボットアーム（肩義手）なのでまず振動が定常状態で0になっていると言う事が最も重要な条件である。

6.3.3. 上腕水平回転運動（θ_1立上り時）の定常偏差

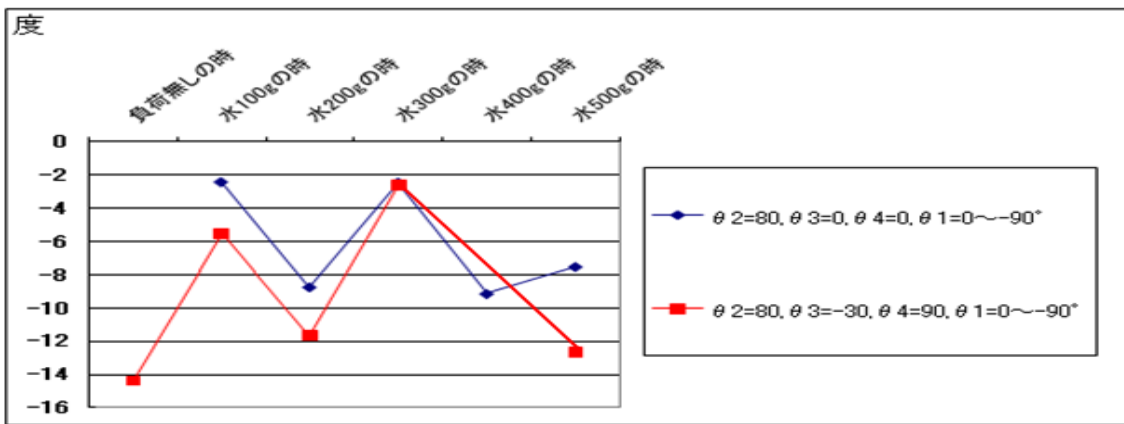



図 50.　θ_1の定常偏差（立上り）(負荷 0～500g)

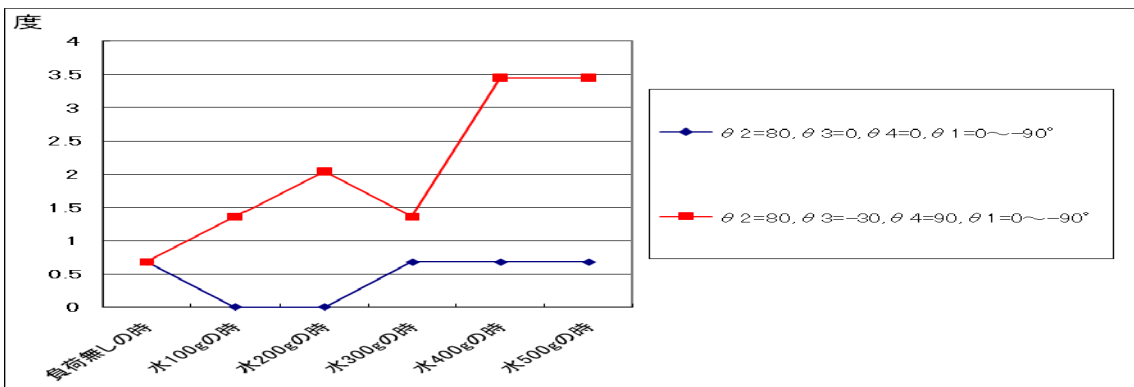



図 51.　θ_2定常偏差（立上り）(負荷 0～500g)

図 50 は上腕水平回転を 0→－90°までステップ応答により最高スピードで動かせたときの立上りの定常偏差であり，図 51 はその時の θ_2の定常偏差である。エネルギー吸収ボックスが弾性変形内で変形しながら振動を制止させている事が分かる。

6.3.4. 上腕水平回転運動（θ_1立下り時）の定常偏差

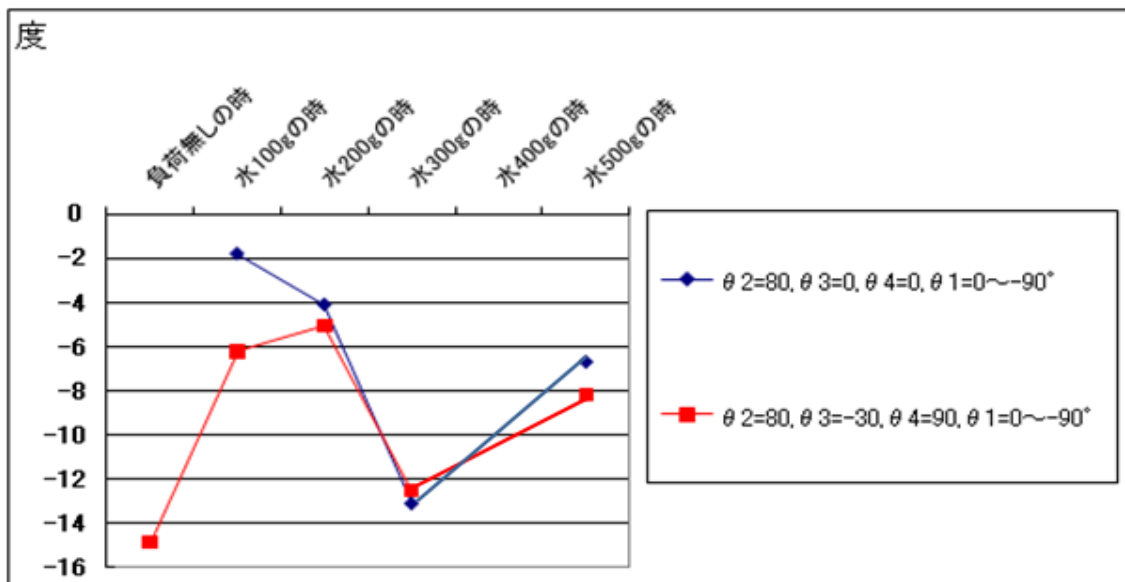



図 52.　θ_1の定常偏差（立下り）(負荷 0～500g)

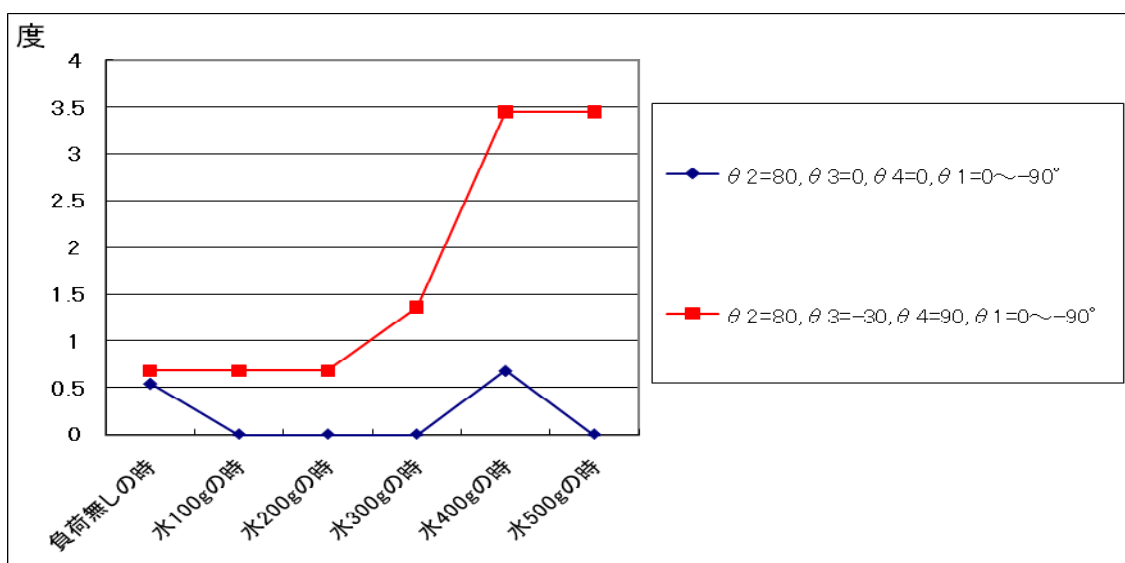



図 53.　θ_2定常偏差（立下り）(負荷 0～500g)

図 52 は上腕水平回転を 0→－90° までステップ応答により最高スピードで動かせたときの立下りの定常偏差であり，図 53 はその時の θ_2の定常偏差を処理し，グラフ化したものである。本データより θ_1の変化に応じて θ_2も変化しており，エネルギー吸収ボックスと名付けたダンピングファクター弾性限界内で変形しながら手先の振動が起こらないよう変形している事が良く理解できる。

6.3.5. 定常偏差についての考察

θ_1と θ_2のステップ応答波形を θ_3，θ_4，θ_5をパラメータとしてたくさんのデータを GL900 で縦軸 16 ビットの精度で，横軸 10μsec のサンプリングタイムでコンピュータにデータを集めた。エクセルにより，立上り時間・立下り時間，±2%に対応した整定時間，θ_2を動かした時の定常偏差とその

時の θ_1の定常偏差，θ_1を動かした時の定常偏差とその時の θ_2の定常偏差を測定しグラフ化した。その結果，エネルギー吸収ボックスは上腕の姿勢角に応じて，弾性限界内で四角形が平行四辺形になる様に弾性変形しながら余分な振動成分をアルミの表面分子の振動エネルギーに与えることにより，熱という形で約 2，3 秒以内に振動はなくなっていることがわかった。高速で動くほど風速は早くなるので熱は放出されやすい。この実験結果により柔軟関節肩義手は製作可能であることがわかった。欠点として上記のような θ_1と θ_2の定常偏差に対応した目標値との誤差が生ずるが，日本で最初のサリドマイド児用の電動義手を開発した徳大チームの１つである徳島大学医学部整形外科の先生方の考えでは，軽量化と外観を向上させる方がより患者さんに喜んでもらえると言う意見である。しかし，ZMP 社のモーションセンサー（本研究紀要，木下他: “エネルギー変換効率の良い６自由度柔軟関節肩義手（SDP，ロボットアーム 1.45kg）の顔面方位制御システム用肩部 2 自由度位置検出センサの開発”）を用いれば θ_1, θ_2の定常偏差はソフトウェアサーボを用いて０に近づけることができる。よって， ZMP 社のモーションセンサーIMU-Z を用いれば位置決め精度が要求される産業用ロボットとして応用可能である事が予想される。

7. まとめ

KRS-6003HV のトルクが 67kg･cm と大きいので θ_2の上腕挙上角に並列に 2 個使用すると，水を入れたペットボトル 500g を約 90%のエネルギー変換効率で持ち上げることが可能であった。

KRS-2552HV を手先の開閉に使用する時，手の親指と中指を合わせることで物を持ちやすくなると考えた。しかし思った以上にグローブは頑丈で，モータのトルクが足りずこのサーボモータでは 300g のペットボトルを把持することが限界であった。故に, 手先のグローブ内の θ_6のモータを KRS-4034HV（41.7kg･cm，11.1V，61.2g）のハイトルクモータへ変更した。ストレッチ[29]（サーボの保持特性カーブ）をほぼ最大の 120（MAX127，産業用ロボット用）として上腕挙上運動(θ_2)のデータを少し測定できた。現在はストレッチをほぼ最大（産業用ロボット）の時とストレッチ標準状態(60)との比較がプログラム動作でしか行えていない。そこで今後はこれまでに測定した制御工学にある各パラメータで同様の測定とデータ処理を行う必要がある。本研究で提案した６自由度柔軟関節ロボットアーム（肩義手）を用いれば，工場の自動化に使用されている現在のロボットをエネルギー変換効率約 90％に近い省エネタイプとする事が可能となり，重量も大幅に軽量化できるため環境に優しい工場システムを実現可能となり，エネルギー問題解決の一方向性を提案できたと確信する。

8. 謝辞

本研究にあたって，参考文献に示した有本卓先生の研究成果に基づき，本研究成果を完成させる事が出来たと思うので心より深く感謝します。また，JBL[31]の大型スピーカの冷却方法も本研究に参考となっており感謝します。香川高等専門学校嘉門雅史校長先生のオリジナル，革命的，時代を超えて使用される(ORT)を満たす技術を開発せよとのアドバイスに心より感謝します。電動義手研究の恩師徳島大学工学部電子工学科故原田尚文教授に深謝します。初代詫間電波高専故石黒美種校長先生の励ましに感謝します。また，共和工業，佐藤技研，緑測器，近藤科学，ZMP 社の各株式会社には研究に協力していただき深く感謝しています。また，卒業研究として木下研究室で努力してくれた全ての卒業生に感謝します。

9. 参考文献

1) 木下敏治　他：“肩の２自由度に柔軟関節を用いた 6 自由度柔軟関節肩義手のモーションプロセッサ2HV を使用した顔面方位制御システムの開発”，香川高等専門学校研究紀要第１号，p.113-130 (2010)
2) 木下敏治　他：“高トルクなシリアル RC サーボモータを用いた 6 自由度柔軟関節肩義手の協調動作制御システム”，香川高等専門学校研究紀要第１号，p.131-138(2010)
3) 近藤科学株式会社：MP2Editor+MotionGenerator　取扱説明書，(2009)
4) 舟久保熙康：“医用精密工学 - 生体への工学的アプローチ -”，丸善株式会社(1983)
5) 赤澤堅造 他：動力義手・装具の研究開発の現状と将来, BME (医用電子と生体工学), Vol.13No.2, p.34-41 (1999)
6) Inoue Takahiro：Mechanics and control of soft-fingered manipulation，Springer(2008)

7) Birglen Lionel : Under actuated robotic hands, Springer(2008)
8) 有本卓：Control theory of multi-fingered hands: a modeling，Springer(2007)
9) 加藤　他：筋電義手使用による運動機能再建の評価, 日本ロボット学会誌 October 2009, Vol.27 No.8，p102-108(2009)
10) 木下敏治　他："クランク拮抗方式による形状記憶合金ロボットシステムの研究，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 34 号，p47-56(2006)
11) 木下敏治　他："RC サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の協調動作制御システムの開発"，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 35 号，p33-44 (2007)
12) 木下敏治　他："高トルク・軽量な RC サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の開発"，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 35 号，p45-52 (2007)
13) 木下敏治　他："ロボットコントロールボード RCB-1 を用いた 6 自由度肩義手の協調動作制御システムの開発"，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 36 号，p37-46(2008)
14) 木下敏治　他："RC サーボコントローラ AGB65-RS C を用いた 6 自由度肩義手の協調動作制御システムの開発"，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 36 号，p47-56(2008)
15) 木下敏治　他："肩義手のための RC サーボコントローラ AGB65-RSC を用いた感圧センサーの開発", 詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 37 号，p 55- 67(2009)
16) 木下敏治　他："6 自由度肩義手協調動作制御システム用モーション作成の研究", 本誌,詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 37 号，p69-85(2009)
17) 有本卓：柔軟関節ロボットの制御，新版ロボットの力学と制御，朝倉書店，p96-99(2002)
18) 有本卓：Control theory of non-linear mechanical systems, Clarendon Press: a passivity-based and circuit-theoretic approach，Clarendon Press ，(1996)
19) B&W (Bowers & Wilkins)800 Series カタログ，(2009)
20) フィクスト・サスペンション・トランスデューサー(略称 FST)，B&W(Bowers & Wilkins)683/684 Series カタログ(2009)
21) 日本塑性加工学会：非線形有限要素法，コロナ社(1994)
22) 舟久保熙康：医用精密工学-生体への光学的アプローチ-，丸善株式会社，(1983)
23) 顧　蘭明：肩義手の顔面方位制御アルゴリズムの改良，昭和 62 年度卒業論文，(1987)
24) 久本将貴, 6 自由度肩義手の顔面方位制御システムの開発，香川高専電子通信工学専攻中四国専攻科発表会論文集，(2010)
25) 近藤科学株式会社，MP2Editor+MotionGenerator 取扱説明書
26) 久本 将貴："6 自由度肩義手の顔面方位制御システムの開発"，香川高等専門学校詫間キャンパス電子通信システム工学専攻科平成20 年度専攻科特別研究論文集，(2009)
27) 木下敏治　他："6 自由度肩義手協調動作制御システム用モーション作成の研究"，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 37 号，p.69-85 (2009)
28) 木下敏治　他："肩義手のための RC サーボコントローラ AGB65-RSC を用いた感圧センサーの開発"，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 37 号，p.55-67(2009)
29) 近藤科学株式会社：シリアルマネージャー for ICS3.0 V1.5 ソフトウェアマニュアル(2009)
30) 齊藤浩一："国立東京工業高等専門学校・齊藤先生の e-nuvo IMU-Z で学ぶ 9 軸モーションセンサ"，株式会社 ZMP，(2010)
31) ハーマンインターナショナル株式会社："38cm/3Way Studio Monitor MODEL4365 カタログ, http://www.haman-japan.co.jp